

机械工程前沿著作系列
HEP Series in Mechanical Engineering Frontiers

HEP
MEF

无损检测新技术及应用

New Nondestructive Testing Technology and Its Application

丁守宝 刘富君 主编
高继轩 主审

机械工程前沿著作系列
HEP Series in Mechanical Engineering Frontiers

HEP
MEF

无损检测新技术及应用

New Nondestructive Testing Technology and Its Application

丁守宝 刘富君 主编
高继轩 主审

WUSUN JIANCE
XINJISHU JI
YINGYONG



高等教育出版社·北京
HIGHER EDUCATION PRESS BEIJING

内容简介

本书全面介绍了无损检测的目的、意义和发展情况,系统阐述了各种无损检测新技术的原理、特点、发展趋势、检测工艺、仪器设备,并详细给出了工程应用实例。本书涉及的无损检测新技术包括超声相控阵、超声 TOFD、导波、激光超声、漏磁、磁记忆、远场涡流、声发射,以及以先进无损检测技术为基础所开展的聚乙烯接头无损检测和基于风险的检验。

本书适合于从事无损检测技术及相关领域的工程技术人员、科研人员以及相关专业的研究生、教师阅读、参考。

图书在版编目(CIP)数据

无损检测新技术及应用 / 丁守宝,刘富君主编. —
北京:高等教育出版社,2012.9
ISBN 978 - 7 - 04 - 036071 - 4

I. ①无… II. ①丁… ②刘… III. ①无损检验
IV. ①TG115.28

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2012)第 201091 号

策划编辑	刘占伟	责任编辑	刘占伟	封面设计	杨立新	版式设计	于 婕
插图绘制	尹 莉	责任校对	杨凤玲	责任印制	刘思涵		

出版发行 高等教育出版社
社 址 北京市西城区德外大街 4 号
邮政编码 100120
印 刷 肥城新华印刷有限公司
开 本 787mm × 1092mm 1/16
印 张 25
字 数 520 千字
插 页 3
购书热线 010 - 58581118

咨询电话 400 - 810 - 0598
网 址 <http://www.hep.edu.cn>
<http://www.hep.com.cn>
网上订购 <http://www.landracom.com>
<http://www.landracom.com.cn>
版 次 2012 年 9 月第 1 版
印 次 2012 年 9 月第 1 次印刷
定 价 79.00 元

本书如有缺页、倒页、脱页等质量问题,请到所购图书销售部门联系调换
版权所有 侵权必究
物 料 号 36071 - 00

编写人员名单

主编：

丁守宝、刘富君

主审：

高继轩

参加编写人员：

第1章 凌张伟、刘富君、唐萍

第2章 牟彦春、金南辉、夏珺芳

第3章 金南辉、牟彦春、王丽芹

第4章 唐志峰、吕福在、胡剑虹

第5章 刘仲强、郭伟灿

第6章 郑慕林、刘富君、钱岳强

第7章 付元杰、丁守宝

第8章 牟彦春、金南辉、朱晓智

第9章 徐彦廷

第10章 郭伟灿、丁守宝

第11章 孔帅、刘富君、赵力伟

序

无损检测技术是在物理学、材料科学、机械工程、电子和计算机科学等多学科基础上发展起来的面向工程应用的学科，其中物理学更是孕育了丰厚的无损检测底蕴，是无损检测新技术的摇篮。无损检测技术是控制产品质量和保障在役设备安全运行的基础性技术之一，它在我国的国计民生中起着重要作用。近十几年来，随着我国经济和科技水平的迅速发展，各主要工业部门，例如航空航天、特种设备、核电、铁路、化工、冶金等，都在无损检测技术领域的设备、技术、人才等方面有了大幅度的投入，促使我国无损检测技术水平在整体上有了很大提高，取得了跨越式的发展。各工业部门的无损检测队伍将无损检测技术积极应用到国家大型工程项目和涉及安全、民生的重大项目服务中，独立自主地研究和解决了许多关键问题 and 应用难题，取得了可喜的成就。

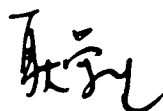
随着现代化的不断发展，对无损检测技术也提出越来越高的要求，众多无损检测新技术也应运而生并逐渐发展和成熟起来。近年来，超声相控阵技术、非接触超声检测技术、导波技术、漏磁检测技术、激光和红外检测技术等新技术受到了特别关注，国内外所报道的文献也不少，然而针对多种无损检测新技术在某一领域的专题总结和介绍却并不多见。

特种设备，包括锅炉、压力容器、压力管道、埋地油/气管道、起重机、电梯、游乐设施等，量大而面广，是国民经济和人民生活的重要基础性设备，也是公共安全的重要组成部分。在特种设备检验检测过程中，存在着大量的无损检测需求。为了更好地促进无损检测新技术在我国特种设备领域的普及应用，进一步保障特种设备安全高效运行，本书作者在认真总结我国无损检测技术应用和发展情况的基础上，针对一系列无损检测新技术，结合自身特种设备检验检测领域的研究成果和丰富经验编写完成此书。该书全面、系统地总结和介绍了无损检测技术的国内外发展情况以及一系列无损检测新技术的基本原理、技术特点、仪器设备、技术关键、检测工艺和工程应用等。这些新技术包括超声相控阵、超声TOFD、导波、激光超声、漏磁、磁记忆、远场涡流、声发射等。该书还包括聚乙烯接头无损检测技术和基于风险的检验技术，这部分内容以无损检测技术为基础，在相应的领域进行了详细而深入的介绍，颇具特色。

该书作者多年来一直从事特种设备无损检测技术的研究，具有坚实的无损检测理论基础和丰富的工程实践经验。全书内容广泛而充实，将无损检测理论紧密联系实际需求，特别是对每种新技术都引入了很多工程实例，内容翔实，使该书

具有很强的实用性。尽管该书的工程实例多是针对特种设备领域，但对航空航天、核电、铁路等其他领域依然非常具有参考价值，同时该书也可供大专院校相关学科的师生参考使用。相信该书对我国无损检测领域的工程技术人员、检验检测和监察人员以及技术研究和仪器开发人员都具有重要的参考价值，其出版将有力推动无损检测新技术在我国工业领域的推广应用，将为进一步提高产品质量和在役设备的安全水平，提高无损检测科技工作者的理论和应用水平做出贡献，并为促进我国无损检测事业不断向前发展发挥重要作用。

无损检测学会理事长



2012年5月22日

前 言

无损检测技术是一门涉及多学科、多领域，具有较强综合性和实践性的工程应用技术，其重要性已经被各部门所重视。无损检测技术历史悠久、体系庞大、种类繁多、应用广泛，特别是随着现代材料科学、电子学、信息技术以及计算机技术等学科不断发展，新技术、新方法、新仪器、新应用领域不断涌现。在工业应用领域，无损检测技术在提高产品质量、节约生产成本、保障在役设备安全运行等方面有着重要意义，应用极为广泛。随着检测要求的不断提高，很多无损检测新技术往往最先应用到工业领域，并在应用中得到逐步发展和成熟。

本书编者在工业无损检测领域，特别是在锅炉、压力容器、压力管道等特种设备无损检测领域具有丰富的实践经验和专项科研积累。由于传统无损检测技术已经非常成熟，可参考的书籍也较多，因此本书重点围绕最近无损检测技术领域发展和成熟起来的多项新技术展开介绍。本书是编者研究和应用这些无损检测新技术所积累的丰富经验和成果的结晶，希望本书能够进一步促进无损检测新技术在我国的发展和应用，亦望作为编者与同行交流沟通、互相学习进步的有益载体。

全书共分 11 章，第 1 章绪论，扼要介绍了无损检测的含义、特点、意义、发展历程以及技术分类和发展趋势，重点介绍了无损检测在我国的发展情况；第 2 ~ 9 章，分别讨论了超声相控阵、超声 TOFD、导波、激光超声、漏磁、磁记忆、远场涡流、声发射共 8 种无损检测新技术，包括它们的基本原理、发展情况、检测仪器、技术工艺以及工程应用案例等；第 10 章和第 11 章则介绍了两个以无损检测技术为基础的专题技术，即聚乙烯接头无损检测技术和基于风险的检验技术，这两项技术是当前相关领域的研究热点，特此作为专题成章介绍。

本书在内容选择及编写上具有以下特点。

(1) 突出新技术。本书着重介绍的是无损检测领域最近几年发展和成熟起来的新技术，对于传统的五大类无损检测技术(超声、射线、渗透、磁粉、涡流)并没做过多介绍。

(2) 突出实践性。强实践性是无损检测技术相比于其他技术的一大特色。本书编者长期工作在无损检测技术应用和研究的第一线，积累了丰富的经验。各章节中均有大篇幅介绍相关技术的工程应用，内容全面而翔实，这些工程应用均为编者实践经验的总结和提炼，有利于读者参考学习，具有非常强的实用性。

(3) 突出专业性。无损检测技术最近几年发展较快，涌现出的新技术也很多，但是本书并没有罗列所有的新技术，而是突出了作者的专业性。一方面，受限于

编者知识领域，选择了最为擅长、最为熟悉的技术领域进行了介绍；另一方面，尽管新技术很多，但是部分新技术并没有成熟到实际应用的阶段，因此本书并没有作介绍。

本书是在国家质量监督检验检疫总局和浙江省质量技术监督局的关心支持下完成的。在本书的编写过程中还得到了西安交通大学林宗虎院士、东北石油大学戴光教授的大力支持，中国无损检测学会理事长耿荣生教授更是在百忙之中为本书作序，编者在此一并表示感谢。

由于时间和水平有限，书中可能存在一些不妥之处，恳切各位读者批评指正。

编 者

2012年5月于杭州

目 录

□ 第 1 章	绪论	1
1.1	无损检测概述	1
1.1.1	无损检测的含义和特点	1
1.1.2	无损检测的目的和意义	3
1.1.3	无损检测的发展历程	4
1.2	无损检测的主要技术分类和特点	5
1.3	无损检测的发展趋势	7
1.4	我国无损检测的发展	9
1.4.1	技术人才培养	10
1.4.2	技术发展情况	10
1.4.3	国际合作和交流	11
1.5	本书的重点和特色	12
	参考文献	13
□ 第 2 章	相控阵检测技术及其应用	15
2.1	超声相控阵技术的发展历史	15
2.2	超声相控阵检测原理	16
2.2.1	超声相控阵检测概述	16
2.2.2	超声相控阵检测的特点	16
2.2.3	延时和聚焦	17
2.2.4	发射和接收	18
2.2.5	扫描模式	18
2.3	相控阵延时律或聚焦律	19
2.3.1	无斜楔探头	19
2.3.2	有斜楔探头	20
2.3.3	延时控频	21
2.4	相控阵系统的基本组成	21
2.5	超声相控阵探头和声场	21
2.5.1	压电复合材料的结构	22
2.5.2	压电复合材料探头的优点	23
2.5.3	工业用相控阵探头的类型	23
2.5.4	线型阵列探头特性	25
2.5.5	有斜楔的相控阵探头主要特性	27

2.5.6	相控阵探头标志	28
2.6	超声相控阵检测技术的扫描模式和图像显示	29
2.6.1	相控阵的扫描模式	29
2.6.2	相控阵检测基本视图	30
2.7	超声相控阵检测技术的优点与局限性	32
2.7.1	超声相控阵检测技术的优点	32
2.7.2	超声相控阵检测技术的局限性	32
2.8	超声相控阵检测技术的工程应用	33
2.8.1	超声相控阵技术在电力工业中的主要应用范围	33
2.8.2	超声相控阵检测技术检测窄间隙对接焊接接头坡口缺陷	34
2.8.3	超声相控阵检测技术在电站锅炉接管座角焊缝检测中的应用	35
2.8.4	小径管对接焊接接头相控阵检测与射线检测技术研究	42
	参考文献	53
□ 第3章	TOFD 检测技术及其应用	54
3.1	TOFD 检测技术概述	54
3.2	衍射基本原理	55
3.2.1	衍射现象	55
3.2.2	不同角度下衍射信号波幅的变化	57
3.3	TOFD 技术的基本知识	58
3.3.1	TOFD 技术的基本配置	58
3.3.2	TOFD 技术使用的探头	58
3.3.3	TOFD 技术所采用的超声波波型	59
3.3.4	TOFD 声场中的 A 扫信号	59
3.3.5	相位关系	61
3.3.6	深度计算	62
3.3.7	深度校准和 PCS 设定	64
3.3.8	TOFD 技术的图像显示	64
3.3.9	TOFD 扫描类型	65
3.3.10	信号位置的测量	68
3.3.11	TOFD 检测的盲区	69
3.4	TOFD 检测的优点及局限性	70
3.4.1	TOFD 检测的优点	70
3.4.2	TOFD 技术的局限性	70
3.5	TOFD 检测系统	71
3.5.1	TOFD 检测设备	71
3.5.2	TOFD 检测仪器	71
3.5.3	TOFD 探头	72
3.5.4	TOFD 检测试块	73

3.6	TOFD 检测工艺	73
3.6.1	表面盲区	73
3.6.2	扫描次数的选择	74
3.6.3	探头的选择	74
3.6.4	探头间距的选择	77
3.6.5	增益设置与校准方法的选择	77
3.6.6	扫描增量设置	78
3.6.7	检测系统校准及复核	78
3.7	TOFD 缺陷的信号特征	80
3.7.1	上表面开口缺陷的信号特征	80
3.7.2	下表面开口缺陷的信号特征	81
3.7.3	贯穿性缺陷的信号特征	82
3.7.4	埋藏的点状缺陷的信号特征	83
3.7.5	埋藏的没有自身高度的缺陷的信号特征	83
3.7.6	埋藏的有自身高度的缺陷的信号特征	84
3.8	TOFD 检测技术的工程应用	84
3.8.1	TOFD 检测系统要求	85
3.8.2	电站锅炉管道 TOFD 检测工艺要点	88
3.8.3	检测实施	90
3.8.4	检测数据分析与解释	91
3.8.5	表面盲区的补充检测	91
3.8.6	主蒸汽管道和再热热段管道 TOFD 检测应用实例	91
	参考文献	94
□ 第 4 章	导波检测技术	95
4.1	导波检测技术概述	95
4.1.1	导波的概念	95
4.1.2	导波检测的基本原理	95
4.1.3	导波检测技术的优点	96
4.1.4	导波检测技术的局限性	96
4.1.5	导波检测技术的发展过程	97
4.2	导波检测的基础理论	98
4.2.1	压力管道中导波的理论	98
4.2.2	相速度和群速度	101
4.2.3	频散曲线	102
4.2.4	导波信号的衰减及补偿	103
4.2.5	导波方向控制原理	103
4.3	导波传感器的种类及其技术特点	105
4.3.1	压电传感器	106

4.3.2	电磁超声传感器	107
4.3.3	磁致伸缩导波传感器	108
4.4	信号处理方法	112
4.4.1	导波信号处理中的问题	112
4.4.2	导波信号的时频分析方法	113
4.4.3	导波信号的降噪方法	121
4.4.4	降噪算法在磁致伸缩导波信号处理中的应用	123
4.5	检测仪器	125
4.5.1	MSGW 系统工作原理	127
4.5.2	MSGW 系统性能指标	128
4.5.3	MSGW 系统检测流程	128
4.6	工程应用实例	130
4.6.1	样管实验	130
4.6.2	现场实验	131
	参考文献	133
□ 第 5 章	激光超声技术	134
5.1	激光超声技术简介	134
5.2	激光超声技术的发展历程	134
5.3	激光超声理论	135
5.3.1	激光超声理论概述	135
5.3.2	激光超声激发原理	136
5.3.3	激光超声的波形特性	138
5.3.4	激光超声检测技术	139
5.3.5	激光超声的应用	143
5.3.6	激光超声技术应用实例	144
5.4	激光超声技术存在的问题及发展趋势	147
	参考文献	148
□ 第 6 章	漏磁检测技术	149
6.1	漏磁检测原理	150
6.2	缺陷漏磁场磁偶极子模型	151
6.3	漏磁场分析	152
6.3.1	裂纹缺陷几何形状统计分析	152
6.3.2	裂纹缺陷参数影响分析	153
6.4	漏磁场有限元分析	156
6.4.1	电磁场有限元分析理论	156
6.4.2	有限元方法在漏磁场分析中的应用	157
6.5	裂纹漏磁场静态模拟结果分析	162
6.6	缺陷参量对漏磁场的影响	165

6.6.1	裂纹端面几何形状分析	165
6.6.2	裂纹深度对裂纹漏磁场的影响	167
6.6.3	缺陷漏磁场有限元分析小结	176
6.7	漏磁检测实验分析	177
6.7.1	裂纹漏磁检测实验系统	177
6.7.2	裂纹的制备	178
6.7.3	裂纹深度影响分析	180
6.7.4	裂纹倾斜角度影响分析	181
6.7.5	平行裂纹影响分析	183
6.7.6	实验分析小结	184
6.8	缺陷漏磁检测信号识别	184
6.8.1	人工神经网络概述	185
6.8.2	BP 神经网络概述	185
6.8.3	裂纹缺陷识别 BP 神经网络	187
6.9	漏磁检测技术工程应用	197
6.9.1	储罐罐底板漏磁检测技术的应用	199
6.9.2	管道漏磁检测技术的应用	201
	参考文献	201
□ 第 7 章	金属磁记忆检测技术	203
7.1	金属磁记忆检测技术概述	203
7.1.1	磁记忆检测技术的概念	204
7.1.2	磁记忆检测技术的特点	204
7.1.3	磁记忆检测技术的国内外发展现状	205
7.2	磁记忆检测技术的基础知识	205
7.2.1	物质的磁性	206
7.2.2	物质磁性的产生	207
7.2.3	铁磁物质的磁化机理	208
7.2.4	磁机械效应	213
7.2.5	金属的力学特性	215
7.3	磁记忆检测技术的机理	219
7.3.1	地磁感应效应	220
7.3.2	磁记忆产生机理	222
7.4	磁记忆检测仪器	223
7.4.1	概述	223
7.4.2	硬件系统	224
7.4.3	软件系统	228
7.5	磁记忆检测技术的工程应用	229
7.5.1	磁记忆检测技术在对接焊缝检测中的应用	229

7.5.2	磁记忆检测技术在管道检测中的应用	229
7.5.3	磁记忆检测技术在压力容器检测中的应用	234
7.5.4	磁记忆检测技术在起重机轨道检测中的应用	236
	参考文献	238
□ 第8章	远场涡流检测技术	239
8.1	远场涡流检测技术概述	239
8.2	远场涡流检测原理	240
8.3	远场涡流检测理论	242
8.3.1	远场涡流检测理论推导	242
8.3.2	管壁中的磁场	244
8.3.3	检测线圈的信号	245
8.3.4	远场涡流检测的磁场分布	246
8.3.5	远场涡流效应的机理	248
8.4	远场涡流检测的优点和局限性	252
8.4.1	远场涡流检测的优点	252
8.4.2	远场涡流检测的局限性	252
8.5	远场涡流检测系统	253
8.6	远场涡流检测工艺	254
8.6.1	检测设备	254
8.6.2	操作步骤	256
8.6.3	检测结果的评定与处理	257
8.7	远场涡流检测在电站锅炉水冷壁管检验中的应用	257
	参考文献	262
□ 第9章	声发射检测技术	263
9.1	声发射检测技术概述	263
9.1.1	声发射技术的发展历程及现状	263
9.1.2	声发射检测技术的基本原理	265
9.1.3	声发射技术的特点	267
9.1.4	声发射检测的主要目的	267
9.1.5	声发射技术的应用领域	268
9.1.6	声发射检测的主要术语及定义	268
9.2	声发射信号的处理与分析方法	273
9.2.1	声发射信号的特征参数分析法	274
9.2.2	声发射源的定位方法	279
9.2.3	声发射信号的高级处理技术	290
9.3	压力容器及管道的声发射检测技术	295
9.3.1	声发射检测方案的制订及检测前的准备工作	295
9.3.2	声发射的检测过程	300

9.3.3	声发射数据的分析和源的分类	300
9.3.4	声发射检测结果的评定	301
9.3.5	检验数据记录和报告	302
9.3.6	压力容器及管道声发射检测中需考虑的一些问题	302
9.4	声发射检测案例	305
9.4.1	大型立式储罐底部的声发射在线检测	305
9.4.2	某复杂管道(炉管束)泄漏位置的声发射检测案例	309
9.4.3	某石化公司一台 1000 m ³ 球罐整体与局部声发射检测的 案例	314
9.4.4	高/低温容器或复杂结构声发射在线检测时的波传导方法	319
	参考文献	324
□ 第 10 章	聚乙烯接头无损检测技术	325
10.1	聚乙烯接头无损检测技术概述	325
10.2	超声检测技术研究	329
10.2.1	电熔接头超声检测技术研究	329
10.2.2	热熔接头超声检测技术研究	332
10.3	检测系统	336
10.3.1	AIM33 聚乙烯电熔接头超声检测系统	336
10.3.2	PIE206 聚乙烯热熔接头超声检测系统	338
10.4	缺陷分类与信号识别	339
10.4.1	缺陷分类	339
10.4.2	缺陷信号识别	346
10.5	工程应用实例	349
10.5.1	聚乙烯燃气管道安装工程缺陷检测	349
10.5.2	聚乙烯管道电熔接头过焊质量超声检测与原因分析	351
	参考文献	352
□ 第 11 章	基于风险的检验技术	353
11.1	基于风险的检验概述	353
11.2	基于风险的检验标准体系	356
11.2.1	美国	356
11.2.2	欧洲	357
11.2.3	中国	357
11.3	基于风险的检验软件工具	358
11.4	基于风险的检验实施过程	359
11.5	石化特种设备基于风险的检验	360
11.5.1	项目的目标	361
11.5.2	装置的主要构成	361
11.5.3	装置数据采集	361

11.5.4	腐蚀机理分析	362
11.5.5	划分物流回路和腐蚀回路	363
11.5.6	数据的补充和确认	363
11.5.7	风险评估	364
11.5.8	确定检验计划	364
11.6	电站特种设备基于风险的检验	364
11.6.1	电站高温蒸汽管线风险评定技术研究	365
11.6.2	电站锅炉炉管风险评估技术	367
	参考文献	381

第1章

绪论

■ 1.1 无损检测概述

□ 1.1.1 无损检测的含义和特点

门捷列耶夫曾说过，检测是认识自然界的主要手段，有了检测才有科学。西门子更直接地说，检测就是去认识。因此检测的重要性不言而喻。从信息论的角度讲，检测就是获得信息的过程。在科学研究、工业生产和军事等领域中，检测是必不可少的过程。检测技术是研究如何获取被测参数信息的一门科学，涉及数学、物理、化学、生物学、材料学、机械学、电子、信息和计算机科学等众多学科，可以说检测技术和相应的仪器仪表技术是现代科学技术水平高低的一个标志。

无损检测技术作为检测技术的一个分支有着悠久的历史，同时，随着科学技术的发展，无损检测技术也在不断发展和进步，至今依然朝气蓬勃。

从无损检测的技术特点上讲，无损检测是指在不损害或者不影响被检验对象的使用性能和状态的前提下，利用与被测对象相关的声、光、磁、电以及热等特性，对各种工程材料、结构件、零部件等进行有效的检验和检测，借以评估它们的可靠性、安全性、连续性、完整性以及其他物理性能。特别是检测构件或者材料中是否存在缺陷以及判断缺陷的类型、性质、数量、形状、位置、结构、分布以及包含物等情况，还能检测材料组分、介质厚度、组织状态、应力分布、物理状态等信息。

无损检测技术已历经一个世纪，其应用范围非常广泛，特别是在机械制造、航空航天、核设备、武器系统、铁道与船舶、石油和化工、锅炉、压力容器与管道、建筑等领域更是普遍而不可或缺。有人说，现代工业是建立在无损检测基础上的，德国科学家就说过，无损检测技术是机械工业的四大支柱之一。很难找到其他任何一个应用学科分支，其涵盖的技术知识之渊博、覆盖的基础研究领域之众多、所涉及的应用领域之广泛能与无损检测相比。统计资料显示，经过无损检测后的产品其性能能够得到有效提升，对于机械产品为5%，对于国防、宇航、原子能产品为